

ДО МЕТОДИКИ АКТУАЛІЗАЦІЇ ОСНОВНИХ ТАКСАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ ДЕРЕВОСТАНІВ ТВЕРДОЛИСТЯНИХ ДЕРЕВНИХ ВИДІВ УКРАЇНИ

О. П. БАЛА, кандидат сільськогосподарських наук, доцент
<https://orcid.org/0000-0001-6538-8876>, e-mail: bala@nubip.edu.ua
Національний університет біоресурсів і природокористування України

Безперервне лісовпорядкування, як один із методів впорядкування лісового фонду країни, на відміну від базового, має низку переваг, які передусім надають можливість отримати найбільш повну та достовірну інформацію про сучасний стан лісового фонду, оскільки передбачає щорічне оновлення таксаційних даних про лісовий фонд України. Твердолистяні деревні види (дуб, ясен, бук, граб та інші) посідають особливе місце серед усіх, що зростають на території України, та займають майже 44 % площ лісових ділянок, вкритих лісовою рослинністю. За даними останнього державного обліку лісів станом на 1 січня 2011 р. серед твердолистяних деревних видів переважають насадження дуба звичайного – 62,6 % площі всіх твердолистяних деревних видів, бук лісовий – 20,2 %, граб звичайний – 3,2 % та ясен звичайний, що формує переважно мішані насадження з дубом. Системний підхід до ефективного вирішення проблеми ведення безперервного лісовпорядкування потребує розроблення об'єктивних методів і математичних моделей актуалізації основних таксаційних ознак лісостанів. В Україні для проведення актуалізації таксаційних параметрів деревостанів розроблено дві методики щодо прогнозу їх росту. Перша базується на моделюванні відсотка поточного приросту деревостану за середньою висотою та запасом, друга – на розроблених динамічних бонітетних шкалах і таблицях ходу росту для модальних насаджень. Метою роботи є вдосконалення методичних підходів до моделювання прогнозу росту основних таксаційних показників деревостанів за другою методикою. У результаті проведених досліджень було запропоновано для моделювання прогнозу росту за всіма таксаційними ознаками використовувати нове уніфіковане співвідношення таксаційного показника рік уперед до цього ж показника зараз, помноженого на вік деревостану. Це дало можливість під час моделювання описати зміни в рості за основними таксаційними показниками з майже абсолютною точністю (коефіцієнт детермінації отриманих моделей становить 1,0). Отримане для прогнозування росту рівняння має однаковий вид для деревостанів усіх деревних видів, різного походження, складу та класів бонітету.

Ключові слова: прогноз росту, математичні моделі, модальні деревостани, походження деревостанів, нелінійна регресія.

Актуальність. Забезпечення поступового переходу до ведення господарювання на засадах сталого управління, безперервного, раціонального, невиснажливого

лісокористування та покращення якісного складу лісів є одним із основних завдань сучасного лісового господарства України. Виконання поставлених завдань потребує

не лише застосування комплексу заходів із розширеного відтворення лісових ресурсів, догляду за ними та охорони, а й удосконалення їх обліку, таксаційної оцінки та прогнозу росту для подальшого якісного планування та управління лісовим господарством країни.

Для вирішення зазначених завдань особливе значення має проблема теоретичного та методичного обґрунтування для практичної реалізації системи моделювання оцінки та прогнозу росту деревостанів, що дає змогу отримувати необхідні математичні моделі й таксаційні нормативи у вигляді бонітетних шкал, таблиць ходу росту та продуктивності лісостанів, а також моделей прогнозування зміни таксаційних показників у процесі їх росту.

Створення електронної бази даних «Лісовий фонд України», зокрема автоматизованої інформаційно-картографічної системи «Управління лісовими ресурсами» (УЛР), зумовило необхідність застосування методів обліку лісів, що орієнтовані на особливості автоматизованого оброблення даних.

Особливе місце серед деревних видів, що зростають на території України, посідають твердолистяні (дуб, ясен, бук, граб та інші), які займають майже 44 % від загальної площі лісових ділянок, вкритих лісовою рослинністю, та мають важливе екологічне та господарське значення. За даними останнього державного обліку лісів станом на 1 січня 2011 р. серед твердолистяних деревних видів переважають насадження дуба звичайного – 62,6 % площі всіх твердолистяних деревних видів (з них 51,1 % насінневого та 11,5 % – вегетативного походження), бук лісовий – 20,2 %, граб звичайний – 3,2 % (Handbook of the forest fund of Ukraine, 2012). Чисті за складом ясеневі насадження трапляються дуже рідко (4,6 % загальної площі насаджень з участю ясеня), цей вид є супутнім і зростає переважно з дубом (45,4 % площі) або

створює мішані насадження, де він є головною породою на 39,3 % загальної площі насаджень з участю ясеня (Bala, 2016).

Безперервне лісовпорядкування, як один із методів упорядкування лісового фонду країни, на відміну від базового, має низку переваг, які передусім дають можливість отримати найбільш повну та достовірну інформацію про сучасний стан лісового фонду, оскільки передбачає щорічне оновлення таксаційних даних про лісовий фонд України (Hirs, Novak, & Kashpor, 2004). Поглиблене вивчення закономірностей росту модальних лісостанів має особливе значення під час проведення безперервного лісовпорядкування, оскільки воно враховує не лише сучасний стан насаджень, а і їх зміну в динаміці. Система безперервного лісовпорядкування містить підсистему актуалізації (оновлення) даних лісового фонду, яка потребує розробки нових нормативів для прогнозу росту насаджень.

Однією із важливих складових оцінки сучасного стану насаджень та прогнозу їх росту є створення нормативів продуктивності лісостанів, головними із них є таблиці ходу росту для модальних деревостанів. Дані таблиці дають змогу відобразити особливості динаміки та процесів росту у характерних лісостанах, а також оцінити результати ведення господарства, аналізуючи їх стан. Таблиці ходу росту для модальних деревостанів слугують вихідним матеріалом для розроблення математичних моделей прогнозу росту лісостанів за основними таксаційними показниками.

Системний підхід до ефективного вирішення поставленої проблеми потребує розроблення об'єктивних методів та математичних моделей актуалізації основних таксаційних ознак лісостанів. Наукова обґрунтованість таких моделей значною мірою визначає точність прогностичних оцінок стану лісових наса-

джень, зміст та обсяги проектних господарських заходів, зокрема рубок, пов'язаних із веденням лісового господарства та рубок головного користування.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Система актуалізації лісового фонду входить до складу автоматизованої інформаційно-картографічної системи УЛР і є основною у проведенні всіх розрахунків, що стосуються обслуговування та використання реляційної бази даних «Повидільна таксаційна характеристика лісу» (РБД ПТХЛ). Поєднання РБД ПТХЛ із комплексом програмних і технічних засобів у сукупності забезпечують створення та експлуатацію інформаційних систем накопичення інформації, що надходять від декількох джерел, її оновлення, коригування та багатоцільове використання (Catalog of application software, 2000). Основою РБД ПТХЛ є матеріали лісоінвентаризації минулих років. Щорічне оновлення бази даних проводиться з двох джерел:

- поточні зміни у лісовому фонді, які визначають шляхом проведення натурної таксації безпосередньо у кожному підприємстві у таких лісових ділянках: прийняті до складу лісового фонду; ділянки, у яких змінилась категорія земель; насадження, що постраждали унаслідок стихійного лиха, пожеж, масового розмноження хвороб і шкідників; виділи, де у поточному році були проведені лісгосподарські заходи (Shvets, 1997);
- у насадженнях, де не відбулося ніяких змін, крім природних процесів росту, проводять актуалізацію таксаційних параметрів із використанням розроблених математичних моделей прогнозу росту.

Крім застосування для актуалізації стану лісового фонду, математичні моделі прогнозу росту відкривають цілу низку програмних продуктів для оптимізації ведення лісового господарства за умови використання елементів імітаційного мо-

делювання. Прикладом таких комплексів є різні інформаційні системи, зокрема системи підтримки прийняття управлінських рішень. Основне використання цих програмних комплексів – розроблення та аналіз різних варіантів систем ведення лісового господарства. У світі широке застосування отримали системи для довгострокового аналізу, в основі яких, зазвичай, лежать такі елементи:

- моделі росту і розвитку окремого дерева;
- моделі впливу навколишнього середовища;
- модель диференціації окремих дерев у насадженні.

Поєднання цих компонентів дає можливість розробити моделі росту і розвитку насадження з урахуванням впливу навколишнього середовища та конкурентної боротьби в насадженні між окремими деревами. Такі системи характеризуються досить високою точністю прогнозу, але мають складний математичний апарат і потребують спеціального програмного забезпечення. Відповідно, вартість таких програмних продуктів є значною, тож їх використовують для створення планів ведення господарства на значних територіях або з науковою метою.

Інші системи підтримки прийняття рішень складаються з окремих елементів – моделей прогнозу росту насадження, рубок догляду, рубок головного користування, виходу деревини від різних видів користування. На відміну від попередніх, вартість створення таких систем є незначною, основна галузь їх використання – розроблення планів менеджменту лісових ресурсів для незначних за площею підприємств.

В Україні для проведення актуалізації таксаційних параметрів деревостанів розроблено дві методики щодо прогнозу їх росту. Перша базується на моделюванні відсотка поточного приросту деревостану за середньою висотою та запасом

(Strochinskiy, 1992), а також загальновідомих формулах лісової таксації та використанні деяких табличних даних як нормативних. Другу методику прогнозу росту насаджень уперше було запропоновано та описано в роботі (Lakyda, & Bala, 2012), вона базується на розроблених динамічних бонітетних шкалах і таблицях ходу росту для модальних насаджень. У цьому методі для математичного моделювання використовують основні таксаційні показники, такі як: середня висота, середній діаметр, сума площ поперечних перерізів або видове число і запас на 1 га. За основу моделювання прогнозу росту за всіма таксаційними показниками взято співвідношення значення таксаційного показника рік уперед до того самого показника зараз. Продовження досліджень прогнозу росту деревостанів за цією методикою також проводили інші науковці (Lakyda, Terentiev, & Vasylyshyn, 2012; Lakyda, & Aleksiiuk, 2017; Lakyda, & Atamanchuk, 2014; Lakyda, & Volodymyrenko, 2008; Lakyda, Oborska, Blyshchuk, & Smolin, 2020).

Прогноз росту основних таксаційних показників для модальних деревостанів у наших дослідженнях базується на розробленій динамічній бонітетній шкалі та таблицях ходу росту для модальних деревостанів. Математичному обробленню та моделюванню підлягають основні таксаційні параметри, як-от середня висота, середній діаметр, сума площ поперечних перерізів та запас на 1 га. Інші параметри деревостану є похідними показниками і можуть бути визначені шляхом нескладних математичних розрахунків, зокрема це стосується і прогнозу частини деревостану, що вибирається.

Мета дослідження – удосконалення методичних підходів до моделювання прогнозу росту основних таксаційних показників деревостанів для проведення актуалізації баз даних лісової інформації.

Матеріали і методи дослідження. Для проведення досліджень використо-

ували дані розроблених таблиць ходу росту для модальних деревостанів твердолистяних деревних видів (Bala, 2019). Статистичне оброблення та моделювання математичних залежностей проводили з використанням методів регресійного аналізу, а саме функції нелінійної регресії статистичного пакета прикладних програм IBM SPSS Statistics. В основу цієї функції покладено знаходження коефіцієнтів рівняння за незалежних змінних із використанням методу найменших квадратів. Для аналізу отриманих результатів та їх порівняння застосовували графічний метод.

Результати дослідження та їх обговорення. Використання методу прогнозу росту та актуалізації таксаційних показників, розробленого під керівництвом проф. А. А. Строчинського (Strochinskiy, 1992), передбачає використання значної кількості нормативних значень та співвідношень між певними таксаційними показниками, що ускладнює проведення розрахунків. Другий метод дещо спрощує розрахунки, використовуючи одне уніфіковане співвідношення значення таксаційного показника рік уперед до того самого показника зараз. Загальний вигляд цього відношення такий:

$$T_{A+1}/T_A,$$

де T – значення таксаційного показника,

A – вік деревостану. Це співвідношення може базуватися на даних будь-яких нормативів, таблиць і шкал. Для прогнозування росту наявних насаджень використано розроблені таблиці ходу росту для модальних деревостанів, що враховують біологічні особливості росту кожного деревного виду. Ця методика унеможливорює використання нормативних і базових значень таксаційних показників, які відповідають даним із таблиць ходу росту для нормальних чи оптимальних деревостанів. Зокрема для основних середніх таксаційних показників брали

моделі та розрахунки, що покладені в основу розроблених таблиць ходу росту для модальних штучних чистих дубових деревостанів. Потім, використовуючи розраховані показники з інтервалом в 1 рік, починаючи з віку 10 років, знайшли співвідношення T_{A+1}/T_A , тобто відношення значень таксаційних показників у віці 11 і 10 років, 12 і 11, 13 і 12 і так далі до віку 120 років. Графічну інтерпретацію отриманих співвідношень для основних таксаційних показників, що входять до таблиць ходу росту для модальних деревостанів, наведено на рис. 1. Показано, що вони перебувають у певній залежності щодо віку деревостану. Кожне співвідношення має свої особливості, які переважно проявляються в молодому віці.

З даних рис. 1 можемо простежити, що переважна більшість досліджуваних залежностей має характер гіперболи, тобто зі збільшенням віку поступово спадає та наближується до одиниці, за винятком кількості дерев на 1 га та показника видового числа. На відміну від

усіх інших таксаційних показників, два останні, в натуральних величинах, зі збільшенням віку поступово зменшуються, тоді як інші, навпаки, збільшуються. Отримані залежності загалом математично описати нескладно, проте для прогнозування росту, з урахуванням розрахунку співвідношення показників через один рік, важливим є найбільш точніше описати вхідні дані. Подібні залежності моделювали в попередніх дослідженнях для різних деревних видів із досить високим коефіцієнтом детермінації (понад 0,995) (Lakyda, & Bala, 2012; Lakyda, Terentiev, & Vasylyshyn, 2012; Lakyda, & Aleksiiuk, 2017; Lakyda, & Atamanchuk, 2014; Lakyda, & Volodymyrenko, 2008, Lakyda et al., 2020).

Однак, якщо досліджуване співвідношення перемножити на вік (отримавши $\frac{T_{A+1}}{T_A} \cdot A$) та відобразити його в динаміці, отримаємо такі залежності (рис. 2).

З даних рис. 2 можна побачити, що всі попередні залежності, що мали різний характер, набули залежності, дуже

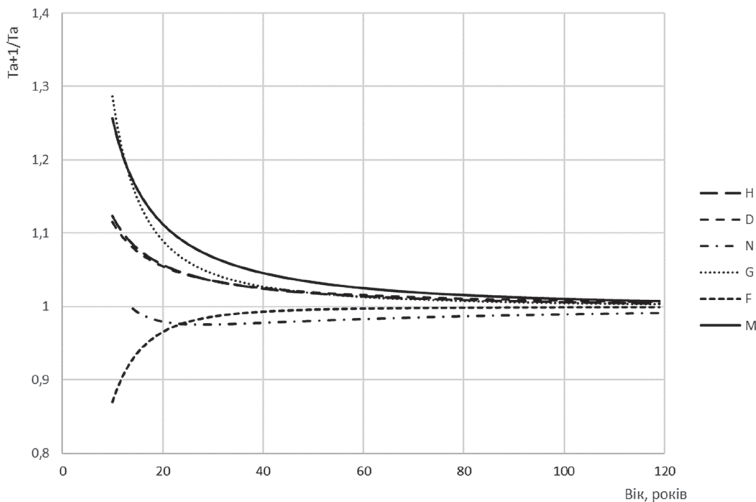


Рис. 1. Динаміка відношення таксаційного показника 1 рік уперед до цього самого показника на теперішній час (H – середня висота, D – середній діаметр, N – кількість дерев на 1 га, G – сума площ перерізів на 1 га, F – видове число, M – запас на 1 га)

подібної до прямої з незначними вигинами та відмінностями у молодому віці.

Спочатку для математичного опису отриманих залежностей було використано рівняння прямої, що має такий вигляд:

$$\frac{T_{A+1}}{T_A} \cdot A = a_0 + a_1 \cdot A. \quad (1)$$

Результати моделювання, отримані вибірково для різних деревних видів у розрізі досліджуваних груп різних за походженням та класами бонітету, показали, що коефіцієнт детермінації варіює у межах 0,989 – 0,998, що загалом є прийнятним, але не задовольняє наші вимоги щодо максимального наближення цього показника до значення 1,000. Для більшої гнучкості математичної моделі опису отриманих залежностей було вирішено використати рівняння такого типу:

$$\frac{T_{A+1}}{T_A} \cdot A = a_0 + a_1 \cdot A + \frac{a_2}{A} + a_3 \cdot A^2 + \frac{a_4}{A^2}. \quad (2)$$

Результати моделювання засвідчили, що за всіма таксаційними показниками в розрізі груп за походженням та класами бонітету, коефіцієнт детермінації

склав 1,000, що повністю задовольняє вимоги до поставлених моделей прогнозу росту.

Отримана математична модель, як і попередні, що базуються на цьому принципі прогнозу росту, має властивість інваріантності за віком. Після остаточних перетворень, змінивши показник віку A на $A+1$, отримаємо таку загальну універсальну формулу для моделювання всіх досліджуваних таксаційних показників, а саме середньої висоти, середнього діаметра, суми площ поперечних перерізів на 1 га і запасу на 1 га для всіх досліджуваних твердолистяних деревних видів:

$$T_{A+n} = T_A \cdot \prod_{i=1}^n \frac{a_0 + a_1 \cdot (A+i) + \frac{a_2}{(A+i)} + a_3 \cdot (A+i)^2 + \frac{a_4}{(A+i)^2}}{A+i}. \quad (3)$$

Використовуючи функцію нелінійної регресії статистичного пакета прикладних програм IBM SPSS Statistics, виконали пошук коефіцієнтів отриманої моделі (3) в розрізі деревних видів, груп досліджуваних деревостанів за походженням та складом, а також найбільш поширеними класами бонітету.

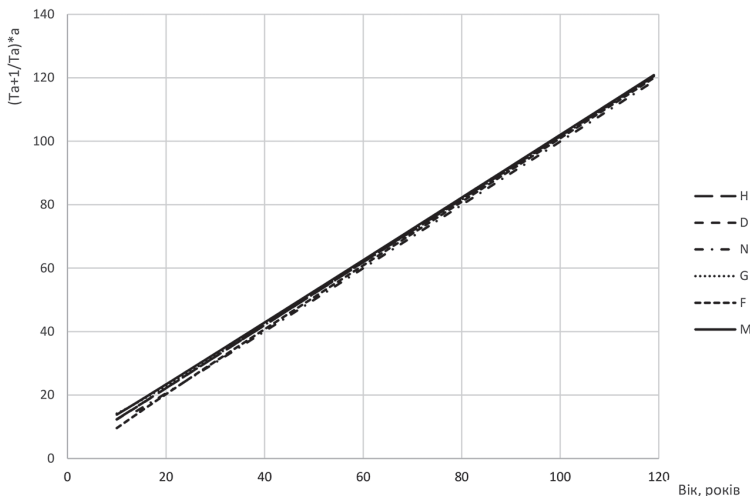


Рис. 2. Динаміка відношення таксаційного показника 1 рік уперед до цього самого показника на теперішній час, помноженого на вік деревостану (H – середня висота, D – середній діаметр, N – кількість дерев на 1 га, G – сума площ перерізів на 1 га, F – видове число, M – запас на 1 га)

Фрагменти результатів проведених розрахунків для запасу на 1 га мішаних букових деревостанів природного походження I класу бонітету за допомогою програми IBM SPSS Statistics наведено на рис. 3.

Із наведених таблиць результатів розрахунку коефіцієнтів регресії можемо побачити, що верхня та нижня межі довірчого інтервалу варіації коефіцієнтів рівняння мають однаковий знак. Це свідчить про значущість усіх отриманих коефіцієнтів, оскільки в межі довірчого інтервалу не потрапляє значення нуля, яке б унеможливило використання коефіцієнта в загальному рівнянні. Отримані коефіцієнти мають високий показник кореляції між собою, що засвідчує однорідність досліджуваної залежності. Сума квадратів залишків у дисперсійному аналізі дуже наближена до нуля, що в результаті розрахунку коефіцієнта детермінації (R^2) становить 1,000. Для всіх інших таксаційних показників і деревних видів результати отримано аналогічні.

Отримані коефіцієнти рівняння (3) для прогнозу запасу на 1 га для букових деревостанів природного походження в розрізі класів бонітету наведено в табл. 1.

Як свідчать дані табл. 1, аналіз величин отриманих коефіцієнтів показав, що

зі збільшенням класу бонітету немає чіткої тенденції у зміні їхніх значень, що простежується для всіх досліджуваних таксаційних показників і деревних видів. Це відхиляє необхідність вирівнювати коефіцієнти моделі залежно від класу бонітету, крім того, в цьому випадку зменшується точність розрахунків. Також для деяких деревних видів коефіцієнт a_3 набуває нульового значення, що виключає його із загальної формули розрахунків. Це іноді відбувається для деяких класів бонітету у вегетативних мішаних дубових деревостанів та вегетативних чистих грабових при прогнозуванні запасу на 1 га у найнижчих класах бонітету.

Враховуючи значну кількість отриманих нормативів, наведемо порівняння розроблених математичних моделей прогнозу росту та розрахунки лише для середньої висоти дубових мішаних деревостанів штучного походження та чистих букових деревостанів, для яких було розроблено таблиці ходу росту для модальних насаджень (Bala, 2019).

Порівняльну оцінку розроблених нормативів прогнозу росту проводили у декілька етапів на різних вікових проміжках для I класу бонітету за такою методикою. Було виділено 6 груп із різ-

1. Коефіцієнти рівняння (3) для прогнозу росту букових деревостанів за запасом на 1 га (M)

Група за походженням та складом	Клас бонітету	Коефіцієнти рівняння (3)				
		a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
Насіннєві природні мішані насаджень	IV	2,044	0,974	14,765	9,188E-05	-50,370
	III	1,909	0,976	14,553	8,579E-05	-52,168
	II	1,859	0,975	16,698	8,949E-05	-63,131
	I	1,763	0,977	15,900	8,306E-05	-61,300
	I ^a	1,705	0,978	15,957	8,039E-05	-62,745
	I ^b	1,666	0,978	15,874	7,799E-05	-63,345
Насіннєві природні чисті насаджень	IV	1,639	0,982	7,284	5,851E-05	-22,348
	III	1,759	0,978	10,635	7,447E-05	-36,670
	II	1,732	0,977	12,747	8,029E-05	-47,152
	I	1,634	0,979	11,359	7,181E-05	-42,284
	I ^a	1,609	0,980	11,781	7,165E-05	-44,825
	I ^b	1,609	0,979	12,441	7,290E-05	-48,219

Аналіз нелінійної регресії

Хронологія ітерацій

Номер ітерації	Сума квадратів залишків	Параметр				
		a0	a1	a2	a3	a4
1.0	582663,274	,000	,000	,000	,000	,000
1.1	,002	1,806	,976	14,940	8,661E-5	-54,680
2.0	,002	1,806	,976	14,940	8,661E-5	-54,680
2.1	,002	1,763	,977	15,900	8,306E-5	-61,300
3.0	,002	1,763	,977	15,900	8,306E-5	-61,300
3.1	,002	1,763	,977	15,900	8,306E-5	-61,300

Оцінки параметрів

Параметр	Оцінка	Стандартна помилка	95% довірчий інтервал	
			нижня межа	верхня межа
a0	1,763	,021	1,720	1,805
a1	,977	,000	,976	,977
a2	15,900	,511	14,888	16,913
a3	8,306E-5	,000	7,984E-5	8,629E-5
a4	-61,300	3,744	-68,724	-53,876

Кореляції оцінок параметрів

	a0	a1	a2	a3	a4
a0	1,000	-,987	-,984	,957	,946
a1	-,987	1,000	,946	-,991	-,893
a2	-,984	,946	1,000	-,901	-,987
a3	,957	-,991	-,901	1,000	,838
a4	,946	-,893	-,987	,838	1,000

Аналіз дисперсії

Джерело	Сума квадратів	Ступені свободи	Середні квадрати
Регресія	593338,711	5	118667,742
Залишок	,002	105	,000
Нескорегований результат	593338,714	110	
Скорегований результат	107035,244	109	

a. R-квадрат = 1 - (Залишкова сума квадратів) / (Скорегована сума квадратів) = 1,000.

Рис. 3. Фрагмент розрахунку результатів моделювання статистичним пакетом IBM SPSS Statistics за методом нелінійної регресії

ним періодом прогнозування. З метою запобігання накопичення похибки під час розрахунків початкову висоту на кожен віковий проміжок брали з порівнюваних таблиць.

Для довготермінового періоду прогнозування використано 2 групи на таких вікових проміжках: 1 група – вік від 10 до 120 років, 2 група – з проміжками 10–60 років і 60–120 років. У середньотерміновому періоді прогнозування та-

кож виділено 2 групи для насаджень від 10 до 120 років та періодом прогнозу через 30 і 15 років відповідно. Для короткотермінового періоду використано 2 групи віком від 10 до 120 років і періодом повторюваності в 10 та 5 років відповідно.

Результати, отримані при прогнозуванні, порівнювали з даними таблиць, які приймали за еталонні для даного віку та розраховували їхню абсолютну і відносну

2. Порівняння прогнозу росту середньої висоти з розробленими ТХР для модальних дубових деревостанів

Вік	Висота за даними ТХР	Віковий проміжок, років																	
		від 10 до 120			10–60 та 60–120			від 10 із періодом 30 років			від 10 із періодом 15 років			від 10 із періодом 10 років			від 10 із періодом 5 років		
		прогноз	різниця	похибка, %	прогноз	різниця	похибка, %	прогноз	різниця	похибка, %	прогноз	різниця	похибка, %	прогноз	різниця	похибка, %	прогноз	різниця	похибка, %
10	3,0																		
15	5,1																5,0	-0,1	-2,0
20	7,2													7,0	-0,2	-2,8	7,1	-0,1	-1,4
25	9,4										9,0	-0,4	-4,3				9,2	-0,2	-2,1
30	11,4													11,2	-0,2	-1,8	11,4	0,0	0,0
35	13,4																13,4	0,0	0,0
40	15,2							14,9	-0,3	-2,0	15,4	0,2	1,3	15,4	0,2	1,3	15,4	0,2	1,3
45	16,9																16,7	-0,2	-1,2
50	18,5													18,2	-0,3	-1,6	18,4	-0,1	-0,5
55	19,9										19,7	-0,2	-1,0				20,0	0,1	0,5
60	21,2				20,7	-0,5	-2,4							21,5	0,3	1,4	21,3	0,1	0,5
65	22,4																22,2	-0,2	-0,9
70	23,5							23,1	-0,4	-1,7	23,3	-0,2	-0,9	23,2	-0,3	-1,3	23,4	-0,1	-0,4
75	24,4																24,5	0,1	0,4
80	25,3													25,5	0,2	0,8	25,4	0,1	0,4
85	26,1										26,4	0,3	1,1				26,2	0,1	0,4
90	26,8													26,7	-0,1	-0,4	26,6	-0,2	-0,7
95	27,5																27,3	-0,2	-0,7
100	28,0							27,9	-0,1	-0,4	27,6	-0,4	-1,4	27,8	-0,2	-0,7	28,0	0,0	0,0
105	28,5																28,5	0,0	0,0
110	29,0													29,0	0,0	0,0	29,0	0,0	0,0
115	29,4										29,5	0,1	0,3				29,5	0,1	0,3
120	29,8	29,0	-0,8	-2,7	29,6	-0,2	-0,7	30,0	0,2	0,7	29,9	0,1	0,3	30,0	0,2	0,7	29,9	0,1	0,3

похибку. Це дало змогу проаналізувати поводження функції на різних часових проміжках росту насадження.

Для прикладу наведемо таблицю порівняння прогнозу росту за середніми висотами із розробленими ТХР для модальних деревостанів дуба звичайного в табл. 2 та для бука лісового в табл. 3.

Аналіз даних наведених таблиць показав, що отримані математичні моделі прогнозу росту досить точно описують досліджувані нормативи ходу росту, зокрема, довготерміновий прогноз на 110 років (від віку 10 років до 120 років) дає похибку для дуба – 2,7 %, для бука – 3,9 %. Зі зменшенням періоду прогнозу ця похибка зменшується, виняток стано-

вить середньотерміновий прогноз із періодом у 15 років із віку 10 років до віку 25 років, за якого для дуба похибка складала 4,3 %, а для бука – 5,1 %. Короткотермінові прогнози показують, на яких вікових етапах моделювання можливі більші чи менші відхилення від досліджуваних таблиць. Найбільший відсоток похибок припадає на вік молодняків, навіть за прогнозу на 5 років для бука лісового у віці із 10 до 15 років похибка становить 5,6 %. Хоча в абсолютних показниках це відхилення є незначними і навіть за найтривалішого прогнозу на 110 років становить менше ніж один метр.

Висновки і перспективи. Проведення вдосконалення методики моделюван-

3. Порівняння прогнозу росту середньої висоти з розробленими ТХР для модальних букових деревостанів

Вік	Висота за даними ТХР	Віковий проміжок, років																	
		від 10 до 120			10–60 та 60–120			від 10 із періодом 30 років			від 10 із періодом 15 років			від 10 із періодом 10 років			від 10 із періодом 5 років		
		прогноз	різниця	похибка, %	прогноз	різниця	похибка, %	прогноз	різниця	похибка, %	прогноз	різниця	похибка, %	прогноз	різниця	похибка, %	прогноз	різниця	похибка, %
10	1,8																		
15	3,6																3,4	-0,2	-5,6
20	5,6													5,4	-0,2	-3,6	5,6	0,0	0,0
25	7,8										7,4	-0,4	-5,1				7,6	-0,2	-2,6
30	9,9													9,6	-0,3	-3,0	9,8	-0,1	-1,0
35	12,1																11,9	-0,2	-1,7
40	14,1							13,4	-0,7	-5,0	13,8	-0,3	-2,1	13,9	-0,2	-1,4	14,1	0,0	0,0
45	16																16,1	0,1	0,6
50	17,8													18,1	0,3	1,7	17,9	0,1	0,6
55	19,4										19,6	0,2	1,0				19,3	-0,1	-0,5
60	20,9				20,0	-0,9	-4,3							20,8	-0,1	-0,5	20,9	0,0	0,0
65	22,3																22,4	0,1	0,4
70	23,5							23,9	0,4	1,7	23,6	0,1	0,4	23,6	0,1	0,4	23,5	0,0	0,0
75	24,6																24,5	-0,1	-0,4
80	25,6													25,5	-0,1	-0,4	25,6	0,0	0,0
85	26,5										26,5	0,0	0,0				26,6	0,1	0,4
90	27,3													27,6	0,3	1,1	27,5	0,2	0,7
95	28,1																27,8	-0,3	-1,1
100	28,7							28,5	-0,2	-0,7	28,5	-0,2	-0,7	28,3	-0,4	-1,4	28,6	-0,1	-0,3
105	29,3																29,2	-0,1	-0,3
110	29,8													29,7	-0,1	-0,3	29,8	0,0	0,0
115	30,2										30,2	0,0	0,0				30,3	0,1	0,3
120	30,6	29,4	-1,2	-3,9	30,7	0,1	0,3	30,7	0,1	0,3	30,7	0,1	0,3	30,8	0,2	0,7	30,7	0,1	0,3

ня прогнозу росту за основними таксаційними показниками з використанням уніфікованого загального співвідношення значень таксаційного показника рік уперед до цього самого показника зараз, помноженого на вік, дало можливість отримати максимально точні моделі прогнозу росту з коефіцієнтом детермінації

рівним 1,0. Зручним є застосування однієї уніфікованої формули для деревостанів різних деревних видів, складом і походженням насаджень, а також класів бонітету. Запропоновану методику можливо застосовувати для прогнозування зміни таксаційних показників деревостанів будь-яких нормативних таблиць.

Список літератури

- Bala, O. P. (2016). Current state and productivity of ash stands in Ukraine. *Scientific bulletin of NULES of Ukraine, series "Forestry and park gardening"*, 255, 11–18 [in Ukrainian].
- Bala, O. P. (2019). *Modeling of growth and productivity of hardwood stands species of Ukraine*. Kyiv: Komprint [in Ukrainian].

- Catalog of application software focused on the processing of forest inventory information by means of a PC class IBM PC (Development of the algorithmization and programming party 1994–2000)*. (2000). Kyiv: State Forestry Committee of Ukraine [in Ukrainian].

- Handbook of the forest fund of Ukraine (according to the materials of the state forest inventory as of 01.01.2011)* (2012). Irpin [in Ukrainian].
- Hirs, O. A., Novak, B. I., & Kashpor, S. M. (2004). *Forest inventory. Textbook*. Kyiv: Aristei [in Ukrainian].
- Lakyda, P. I., & Bala, O. P. (2012). *Actualization of growth parameters of artificial Oak stands of Forest-Steppe of Ukraine's*. Korsun-Shevchenkivskyi: FOP Havryshenko V. M. [in Ukrainian].
- Lakyda, P. I., Oborska, A. E., Blyshchuk, I. V., & Smolin, V. O. (2020). *Prognosis of growth dynamic of alder modal stands of Western Polissya of Ukraine*. Korsun-Shevchenkivskyi: FOP Maydachenko I. S. [in Ukrainian].
- Lakyda, P. I., Terentiev, A. Yu., & Vasylyshyn, R. D. (2012). *Scots pine stands of artificial origin in Ukrainian Polissya – growth and productivity forecast*. Korsun-Shevchenkivskyi: FOP Maydachenko I. S. [in Ukrainian].
- Lakyda, P. I., & Aleksiiuk, I. L. (2017). *Natural pine forest stands of Ukrainian Polissya: growth and productivity forecast*. Korsun-Shevchenkivskyi: FOP Maydachenko I. S. [in Ukrainian].
- Lakyda, P. I., & Atamanchuk, R. V. (2014). *Forecast and productivity of modal birch stands in Ukrainian Polissya*. Korsun-Shevchenkivskyi: FOP Havryshenko V. M. [in Ukrainian].
- Lakyda, P. I., & Volodymyrenko, V. M. (2008). *Artificial spruce stands of the Ukrainian Carpathians – growth and productivity forecast*. Kyiv: ESC IAE [in Ukrainian].
- Shvets, M. I. (1997). The transition of domestic forest management to the technology of continuous forest inventory. In *Materials of the international conference "Forestry science and education: status and prospects for development"* (pp. 250–252) [in Ukrainian].
- Strochinskiy, A. A. (1992). *Methodological and normative-informational support of the system of regulation of the productivity of forest plantations in Ukraine* (Abstract of Doctoral dissertation). Ukrainian Academy of Agriculture, Kiev, Ukraine [in Russian].

Bala, O. P. (2020). To the methods for actualization of main stands parameters of hardwood tree species of Ukraine. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*, 11 (3), 4–14. <https://doi.org/10.31548/forest2020.03.001>

Continuous forest inventory, as one of the methods of forest management of the country, in contrast to the basic inventory, has a number of advantages, which primarily provide the opportunity to obtain the most complete and reliable information about the current state of the forest, as it provides annual updates of main stands parameters of forest found on Ukraine. Hardwood tree species (oak, ash, beech, hornbeam, etc.) occupy a special place among all that grow in Ukraine and occupy almost 44 % of the forest area covered with forest vegetation. According to the latest state forest inventory as of 01.01.2011, hardwood tree species are dominated by oak stands – 62.6 % of the area of all hardwood tree species, forest beech – 20.2 %, hornbeam – 3.2 % and ash ordinary, forming mainly mixed stands with oak. A systematic approach to the effective solution of the problem of continuous forest inventory requires the development of objective methods and mathematical models for updating the main stands parameters of forests. In Ukraine, for actualization main stands parameters, two methods have been developed to forecast their growth. The first is based on modeling the percentage of current increment by average height and wood stock, the second – on the developed dynamic site index curves and yield tables for modal stands. The aim of the work is to improve the methodological approaches to modeling the growth prognosis of the main stands parameters by the second method. To achieve these goals used the method of nonlinear regression using IBM SPSS Statistics. As a result of the conducted researches it was offered to model a new unified ratio of the stands parameter a year ahead to the same stands parameter now multiplied by the age of the stand to model the growth prognosis for all stands parameters. This made it possible during the simulation to describe the changes in growth by the main stands parameters with almost absolute accuracy (the coefficient of determination of the obtained models is 1.0). The equation obtained for growth prognosis has the same form for stands of all tree species, of different origin, composition and site index classes.

Keywords: growth prognosis, mathematical models, modal stands, origin of stands, nonlinear regression.

Отримано: 2020-08-18